

ХІМІЯ ВЫСОКАМАЛЕКУЛЯРНЫХ ЗЛУЧЭННЯЎ
POLYMER CHEMISTRY

УДК 678.6.7:544.23.057;544.25.057
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2023-59-3-234-241>

Поступила в редакцию 04.11.2022
Received 04.11.2022

Е. О. Хилиута¹, Е. В. Гринюк²

¹Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

²Научно-исследовательский институт физико-химических проблем
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

**ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ТРУБЧАТОГО РЕАКТОРА И НАПРАВЛЕНИЯ
ДВИЖЕНИЯ ФРОНТА НА ПРОТЕКАНИЕ ПРОЦЕССА ФРОНТАЛЬНОЙ
СОПОЛИМЕРИЗАЦИИ АКРИЛАМИДА С АКРИЛАТОМ НАТРИЯ
В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ**

Аннотация. Объектами исследования являлись процесс фронтальной сополимеризации акриламида с акрилатом натрия в водных растворах в трубчатых реакторах различных диаметров, а также полученные при этом сополимеры и гидрогели. Изучено влияние диаметра трубчатого реактора и направления движения фронта на протекание процесса фронтальной сополимеризации акриламида и акрилата натрия в водных растворах. Показано, что скорость фронта практически не зависит от диаметра трубчатого реактора, а температура фронта снижается с увеличением диаметра. Определены величины водопоглощения и гель-фракции полученных гидрогелей.

Ключевые слова: фронтальная сополимеризация, акриламид, 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислота, полиэлектролитный гидрогель, направление движения фронта полимеризации, водопоглощение, гель-фракция

Для цитирования. Хилиута, Е. О. Влияние диаметра трубчатого реактора и направления движения фронта на протекание процесса фронтальной сополимеризации акриламида с акрилатом натрия в водных растворах / Е. О. Хилиута, Е. В. Гринюк // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 234–241. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2023-59-3-234-241>

A. A. Khiliuta¹, Y. V. Hryniuk²

¹Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

²Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Belarus

**INFLUENCE OF THE DIAMETER OF A TUBULAR REACTOR AND THE DIRECTION
OF FRONT PROPAGATION ON THE PROCESS OF FRONTAL COPOLYMERIZATION
OF ACRYLAMIDE WITH SODIUM ACRYLATE IN AQUEOUS SOLUTIONS**

Abstracts. The objects of study were the process of frontal copolymerization of acrylamide with sodium acrylate in aqueous solutions in tubular reactors of various diameters and with different directions of front propagation, as well as the resulting copolymers and hydrogels. The effect of the diameter of a tubular reactor and the direction of front propagation on the process of frontal copolymerization of acrylamide and sodium acrylate in aqueous solutions has been studied. It was shown that the front velocity is almost independent of the diameter of the tubular reactor, and the front temperature decreases with increasing diameter. The values of water absorption and gel-fraction of the obtained hydrogels were determined.

Keywords: frontal polymerization, acrylamide, sodium acrylate, acrylic acid, polyelectrolyte hydrogel, water absorption.

For citation: Khiliuta A. A., Hryniuk Y. V. Influence of the diameter of a tubular reactor and the direction of front propagation on the process of frontal copolymerization of acrylamide with sodium acrylate in aqueous solutions. *Vestsi Natsyonal'най akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnyh navuk = Proceedings of the National Academy of Science of Belarus. Chemical series*, 2023, vol. 59, no. 3, pp. 234–241 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2023-59-3-234-241>

Введение. Среди огромного количества известных природных и синтетических высокомолекулярных соединений лишь немногие обладают способностью растворяться в воде. Многие из них относятся к классу полиэлектролитов [1]. Полимеры на основе акриламида (АА) широко используются в различных областях промышленности. Для улучшения физико-химических свойств полимеров и гидрогелей на основе АА используют ионный сомономер, такой как, например, акрилат натрия (ANa) [2].

Основным способом получения сополимеров АА в настоящее время является традиционный способ радикальной полимеризации. В гораздо меньшей степени используется такой метод, как фронтальная полимеризация (ФП) [3]. ФП представляет собой способ синтеза полимеров, отличающийся от других режимов полимеризации наличием подвижной узкой (обычно плоской) пространственной границы, в которой происходит реакция (фронт полимеризации) и которая отделяет исходный мономер от конечного продукта. Необходимыми условиями протекания ФП являются, во-первых, экзотермичность реакции полимеризации, а во-вторых, низкая скорость протекания реакции полимеризации мономеров (или ее отсутствие) при начальной (комнатной) температуре и высокая скорость реакции при температуре фронта, так чтобы скорость тепловыделения превышала скорость теплопотерь. При соблюдении этих условий реакция ФП после иницирования не требует дополнительного нагревания, что уменьшает энергозатраты. В этой связи ФП является очень перспективным подходом к синтезу полимеров и гидрогелей.

В предыдущих работах по ФП были изучены влияние типа инициатора, концентрации на скорость фронта. Фактически ФП проводят в неадиабатическом реакторе в атмосфере, чтобы проверить применимость этого метода для условий, которые часто встречаются на производстве. Поэтому условия окружающей среды, размер и форма реактора, направление движения фронта, а следовательно, и зависящая от этого температура фронта являются ключевыми факторами формирования и перемещения самораспространяющегося теплового фронта, которые влияют и на свойства образующихся конечных продуктов реакции.

Цель настоящей работы – изучение влияния диаметра трубчатого реактора на протекание реакции ФП, влияние направления движения фронта на протекание процесса фронтальной сополимеризации, а также изучение физико-химических свойств полученных продуктов.

Материалы и методы исследований. При выполнении работы использовали следующие соединения: АА с содержанием основного вещества 98,0 % производства Sigma-Aldric; акриловая кислота (АК) марки «ч.» производства ЗАО «Вектон»; персульфат аммония (ПСА) по ГОСТ 20478-75 изм. 1,2,3 марки «х. ч.» без предварительной очистки; ANa, полученный нейтрализацией АК гидроксидом натрия. В качестве растворителя использовали дистиллированную воду. Растворы готовили весовым методом путем растворения точно взвешенных навесок в мерной посуде. Мольная концентрация мономеров во всех экспериментах составляла 25 %.

Все реакции ФП проводили при комнатной температуре и атмосферном давлении. Изначально АА растворяли в заранее отмерянном количестве дистиллированной воды, затем к полученному раствору добавляли рассчитанное количество ANa. К гомогенному раствору мономеров добавляли инициатор.

Реакции, инициированные путем точечного нагрева верхних слоев раствора мономеров, проводили в запаянных с одного конца стеклянных трубках. Нагрев осуществляли до тех пор, пока визуально не наблюдалось начало движения полимеризационного фронта. Скорость фронтов определяли измерением расстояния, пройденного фронтом, за определенный временной интервал. Температуру полимеризационных фронтов измеряли при помощи термопары, погруженной в реакционную смесь.

Водопоглощающую способность гелей и гель-фракции определяли гравиметрическим методом. Образцы для анализа брали из разных участков стеклянной трубки. ИК-спектры ПЭГГ записывали на ИК-Фурье спектрометре BRUKER ALPHA с приставкой НПВО ATR Di. Образцы для записи спектров готовили измельчением и последующим высушиванием сополимеров при 60 °С. Гель предварительно очищали от примесей и непрореагировавших мономеров многократным набуханием в дистиллированной воде и фильтрованием. Определение молекулярной массы (ММ) полученных сополимеров проводили вискозиметрическим методом. Постоянные K и α

для уравнения Марка–Куна–Хаувинка–Сакурады, использовавшегося для расчета ММ, брали из работы [4].

Статистическую обработку результатов проводили с использованием t -распределения, вычисляя среднее значение и величины абсолютной и относительной погрешностей из результатов трех параллельных измерений. Коэффициенты функций находили методом наименьших квадратов, также вычисляя для них величины погрешности. Вид зависимости определяли, находя коэффициент корреляции с предварительным построением графика во избежание появления ложной корреляции. Основная часть результатов обработана с использованием компьютерных программ Microsoft Excel (версия 2010). При доверительной вероятности 0,95 относительная погрешность различных измерений колебалась от 2 до 18 %. Значения коэффициента корреляции были не ниже 0,91.

Результаты и их обсуждение. Одним из основных показателей, характеризующих интенсивность протекания процесса полимеризации во фронтальном режиме, является скорость распространения фронта. В случае тепловой ФП этот параметр в первую очередь определяется тепловым эффектом полимеризации того или иного мономера. Известно, что тепловой эффект полимеризации АА составляет 84 кДж/моль, что позволяет проводить ФП с его участием без особых затруднений. Однако в случае осуществления ФП АА с другими мономерами следует учитывать различия в реакционной способности мономеров. При проведении же ФП в растворах мономеров на ее протекание оказывает влияние ряд других факторов, наиболее существенными являются концентрации мономеров, температура кипения растворителя и его вязкость [3], а также, возможно, и диаметр реактора, что будет исследовано в данной работе.

В качестве сомономера в процессах сополимеризации с АА использовали АNa. Сополимеризация АА с АNa позволяет получать широкий спектр полимеров и ПЭГГ на их основе, применяющихся в различных областях техники, медицины, фармацевтической и нефтедобывающей промышленности. К сожалению, в доступной литературе обнаружить сведения о тепловом эффекте полимеризации АNa не удалось. Однако учитывая хорошую растворимость АА и АNa в воде и их доступность, несомненный интерес представляет изучение процессов фронтальной сополимеризации этих мономеров в водных растворах.

Ранее изучалось влияние размера трубчатого реактора на распространение фронта и характерные свойства гидрогелей полиакриловой кислоты с крахмалом [10]. Внутренний диаметр трубки варьировался от 10 до 45 мм для одной серии экспериментов. Распространяющийся фронт проходил вниз по трубе и приводил к образованию большого количества пузырьков пара на поверхности фронта, прилегающей к полимерному продукту. Часть этих пузырьков перемещалась в полимерную матрицу и затем шумно выходила из трубки, что делало конечный продукт мягким и слегка желтым. Газовые пузырьки, вызванные выпариванием воды, захватывались реакционной смесью и приводили к образованию пористых сополимеров, что было критическим для высокой способности набухания гидрогелей [10].

Увеличение размера трубки влияло на распространение фронта. Наблюдалось, что за счет увеличения диаметра тепло, подведенное к реактору, рассеивалось, и отмечалось снижение температуры фронта. С другой стороны, пузырьки, которые выходили из пробирки, открывали проходы для воздуха через реакционную систему. В результате поступления кислорода из воздуха молекулы полимера, уже сформированные в гель, были подвергнуты окислению, что приводило к увеличению содержания золь и уменьшению содержания геля с увеличением размера трубки. Наибольшая степень набухания для продуктов была получена, когда размер трубки благоприятствовал образованию пористой микроструктуры гидрогелей [10].

Предполагалось, что увеличение диаметра стеклянной трубки при проведении процесса ФП будет вызывать усиление эффектов конвективного массо- и теплопереноса, поскольку процесс происходит в маловязком растворе мономеров и может стать причиной дестабилизации фронта и его затухания. С другой стороны, увеличение диаметра приводит к уменьшению отношения площади реакционного сосуда к его объему, что снижает потери тепла в окружающую среду. В связи с этим трудно предсказать влияние увеличения диаметра реакционного сосуда на осуществимость процесса ФП и на ее макрокинетические параметры в случае осуществления.

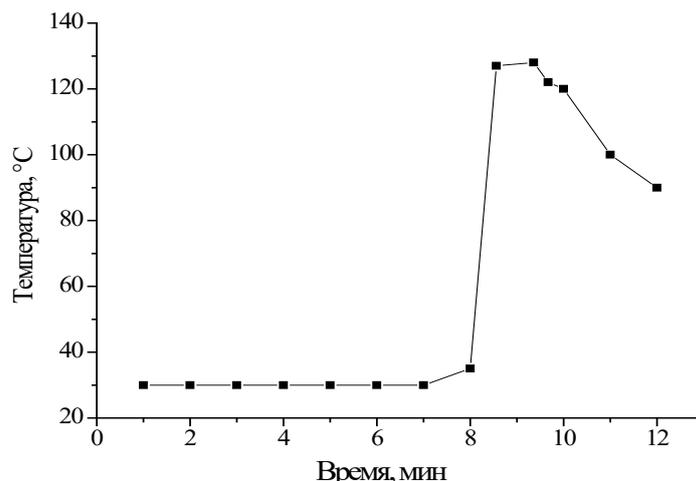


Рис. 1. Температурный профиль полимеризации в трубчатом реакторе с диаметром 5,3 мм при мольном соотношении АА и АNa, равном 75 : 25 и концентрации ПСА 0,1 %

Fig. 1. Temperature profile of polymerization in a tubular reactor with a diameter of 5.3 mm at a molar ratio of AA and ANa equal to 75 : 25 and a PSA concentration of 0.1%

Вначале нами были выполнены исследования влияния диаметра трубчатого реактора на протекание реакции ФП в вертикальном нисходящем режиме и при мольном соотношении АА и АNa, равном 75 : 25, и концентрации ПСА 0,1 %. С целью оценки влияния диаметра реактора и соответственно его объема на осуществимость процесса ФП и на ее макрокинетические параметры был проведен ряд экспериментов в стеклянных трубках с диаметрами 5,0; 5,5; 6,6; 6,7; 7,1; 8,0; 9,3; 11,0; 13,6 мм.

При проведении процесса ФП для каждой реакции исследовали изменение температуры в определенной точке системы с течением времени. Температуру измеряли при помощи термопары, введенной в трубку с исходной смесью мономеров до начала проведения фронтальной сополимеризации. На основании этих данных для каждой реакции строили температурные профили. Типичный вид температурного профиля при фронтальной сополимеризации представлен на рис. 1 для ФП в трубке диаметром 5,3 мм. Из рисунка видно, что температура резко возрастает при приближении полимеризационного фронта к термопаре, что подтверждает протекание процесса во фронтальном режиме. Аналогичные по виду температурные профили были получены и при проведении процесса ФП в трубках других диаметров.

Результаты определения макрокинетических параметров фронта представлены в табл. 1.

Таблица 1. Макрокинетические параметры скорости распространения фронта исследованных полимерных смесей, полученных в трубчатых реакторах разного диаметра

Table 1. Macrokinetic parameters of the front propagation velocity of the studied polymer mixtures obtained in tubular reactors of different diameters

Диаметр реактора, мм	Скорость фронта, см/мин	Температура фронта, °C
5	1,32	136
5,3	1,32	130
6,6	1,22	133
6,7	1,23	124
7,1	1,2	123
8,0	1,32	122
9,3	1,14	121
11	1,28	116
13,6	1,32	101

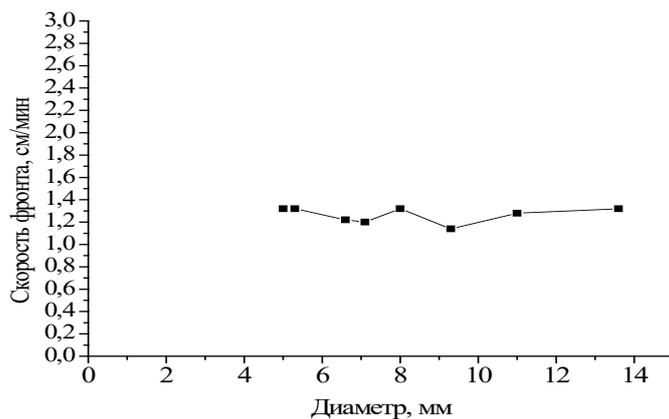


Рис. 2. График зависимости скорости фронта от внутреннего диаметра трубчатого реактора

Fig. 2. Front velocity versus the inner diameter of the tubular reactor

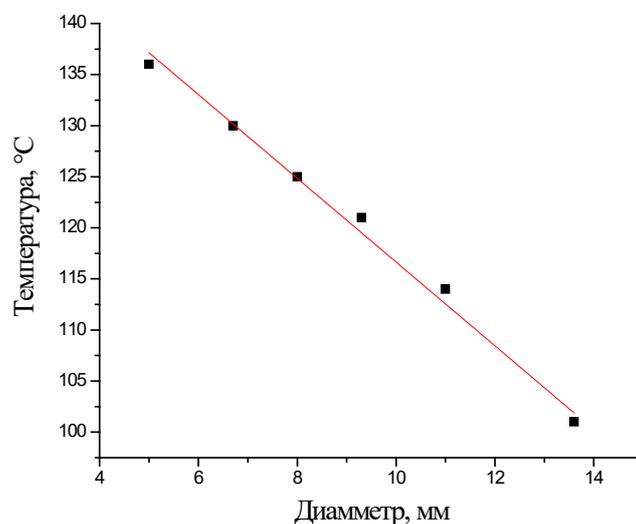


Рис. 3. График зависимости температуры фронта от внутреннего диаметра трубчатого реактора

Fig. 3. Front temperature versus the inner diameter of the tubular reactor

Из данных табл. 1 видно, что при концентрации ПСА 0,1 % сополимеризация протекала в фронтальном режиме в сосудах всех указанных диаметров. Скорости фронта находились в диапазоне 1–2 см/мин.

На рис. 2 представлена зависимость скорости фронта от диаметра реакционного сосуда. Откуда следует, что скорость фронта практически не зависит от диаметра трубки.

Помимо скорости фронта фиксировали температуру фронта как параметр, который может оказывать влияние на свойства полученных продуктов. На рис. 3 представлена зависимость температуры фронта от диаметра трубчатого реактора. В отличие от скорости фронта температура фронта снижается с увеличением диаметра трубки.

Одними из наиболее важных характеристик ПЭГГ, учитывая области их применения, являются их водопоглощающая способность и величины гель-фракций. Эти характеристики изменены для всех полученных в работе ПЭГГ с использованием весового метода. Результаты представлены в табл. 2. Из таблицы следует, что нет однозначной зависимости изменения величины водопоглощения и гель-фракции при изменении диаметра реактора.

С целью подтверждения протекания процесса сополимеризации АА с АNa, а не только гомополимеризации АА, были записаны ИК-спектры синтезированных образцов сополимеров. На рис. 4 приведен ИК-спектр сухой пленки одного из полученных сополимеров.

Таблица 2. Величины водопоглощения и гель-фракции для полученных продуктов
Table 2. Water absorption values and gel fractions for the obtained products

Диаметр реактора, мм	Водопоглощение, г/г	Гель-фракция, %
5,0	320	21
6,6	830	45,5
8,0	730	37

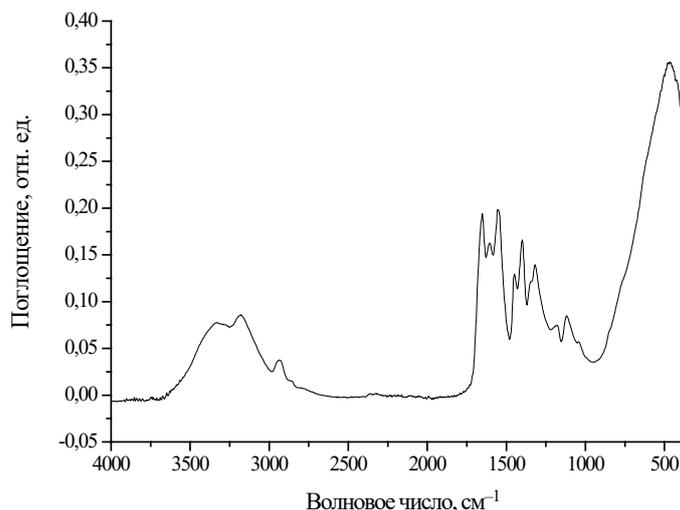


Рис. 4. ИК-спектр поглощения образца, полученного при соотношении АА : АNa, равном 75 : 25, концентрации ПСА 0,1 % и трубчатом реакторе $d = 13,6$ мм

Fig. 4. IR absorption spectrum of a sample obtained with an AA : ANa ratio of 75 : 25 and a PSA concentration of 0.1% and a tubular reactor $d = 13.6$ mm

В ИК-спектре данного образца видны полосы поглощения в области 1550 и 1650 см^{-1} , отвечающие колебаниям связи $\text{C}=\text{O}$ карбоксилатной и амидной групп соответственно, что подтверждает /протекание процесса сополимеризации, а не гомополимеризации акриламида. ИК-спектр не позволяет получить более подробные данные о структуре полимера, а именно о распределении звеньев в цепи и конфигурации цепи в целом. В отсутствие акриламида акрилат натрия фронтально не полимеризуется.

Одной из важных характеристик несшитых линейных полимеров, определяющих области их применения, является их ММ. Молекулярную массу измеряли методом вискозиметрии. Результаты определения ММ сополимеров, полученных в трубках двух различных диаметров, представлены в табл. 3. Данные свидетельствуют, что ММ сополимеров, полученных в трубках двух разных диаметров, близки по значениям. Можно предположить, что изменение диаметра трубки оказывает незначительное влияние на ММ сополимеров.

Таблица 3. Значения ММ сополимеров, полученных при ФП в трубках двух различных диаметров

Table 3. MM values of copolymers obtained by FP in tubes of two different diameters

Диаметр, мм	$M \cdot 10^{-6}$
6,6	0,31
11	0,34

При осуществлении процессов ФП в промышленных непрерывно действующих реакторах сама конструкция реактора может предполагать движение фронта как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. В связи с этим поставлена задача установить принципиальную осуществимость процесса фронтальной сополимеризации АА с АNa в водном растворе при гори-

зонтальном режиме движения фронта. Для установления возможности проведения фронтальной сополимеризации в горизонтальном режиме движения фронта были проведены эксперименты по сополимеризации АА с АNa при мольном соотношении мономеров 75 : 25 % и 90 : 10 % и различных концентрациях инициатора. Результаты экспериментов представлены в табл. 4. Таблица информирует, что при концентрации инициатора 0,1 % реакция фронтальной сополимеризации в горизонтальном режиме движения фронта не протекала, в то время как при проведении процесса в вертикальном нисходящем режиме при тех же условиях сополимеризация осуществлялась.

Т а б л и ц а 4. Макрокинетические параметры фронта исследованных мономерных смесей

T a b l e 4. Macrokinetic parameters of the front of the studied monomer mixtures

Концентрация инициатора, %	75 % АА : 25 % АNa		90 % АА : 10 % АNa	
	скорость, см/мин	температура, °С	скорость, см/мин	температура, °С
0,1	–	–	–	–
0,2	2,6	142	3	140

П р и м е ч а н и е. «–» – реакция фронтальной сополимеризации не наблюдалась.

В табл. 5 представлены величины водопоглощения и гель-фракции ПЭГГ, полученные при различном соотношении мономеров и концентрации инициатора 0,2 % полимеризации, которые близки по значениям.

Т а б л и ц а 5. Величины водопоглощения и гель-фракции для полученных ПЭГГ

T a b l e 5. Water absorption values and gel fractions for the obtained PEGG

Состав смеси мономеров	Водопоглощение, г/г	Гель-фракция, %
75 % АА : 25 % АNa	436	35
90 % АА : 10 % АNa	469	21

Заключение. Изучен процесс фронтальной сополимеризации акриламида с акрилатом натрия в водных растворах в трубчатых реакторах различных диаметров и при различном направлении движения фронта, а также полученные при этом сополимеры и гидрогели.

Показано, что скорость фронта практически не зависит от диаметра трубчатого реактора, а температура фронта снижается с увеличением диаметра. Установлено, что при одних и тех же условиях проведения реакции сополимеризации, а именно одинаковых концентрациях инициатора 0,1 % и одинаковых соотношениях мономеров, в отличие от реакции в вертикальном нисходящем режиме, процесс фронтальной полимеризации в горизонтальном режиме не протекал. Величины гель-фракции не превысили 45 %, а величины водопоглощения – 830 г/г. Молекулярная масса полученных полимеров составила около $3 \cdot 10^5$.

Список использованных источников

1. Deep Eutectic Solvents as Both Active Fillers and Monomers for Frontal Polymerization / J. D. Mota-Morales [et al.] // Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry, 2013. – Vol. 51, № 8. – P. 1767–1773. <https://doi.org/10.1002/pola.26555>
2. Гринюк, Е. В. Фронтальная сополимеризация акриламида с 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислотой и с акрилатом натрия в водных растворах / Е. В. Гринюк // Полимерные материалы и технологии. – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 48–53.
3. Разработка способов синтеза карбоксилированных и сульфонированных ПАА, водных композиций на их основе с веществами, инициирующими при повышенных температурах образование гидрогелей / НИИ физ.-хим. проблем Бел. гос. ун-та; рук. темы Л. П. Круль. – Минск, 2012. – 96 с. – № ГР 20111280.
4. API RP63. Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in enhanced oil recovery operations. – Washington, 1990. – 74 p.
5. Слюсар, О. И. Изучение влияния различных факторов на структурно-механические характеристики гидрогелевых основ полимера акриловой кислоты / О. И. Слюсар, Т. П. Калмыкова, Ф. Керманиан // Хим.-фармацевт. журн. – 2003. – Т. 37, № 5. – С. 51–53.
6. Facile preparation of pH-sensitive poly(acrylic acid-co-acrylamide)/SiO₂ hybrid hydrogels with high strength by in situ frontal polymerization / Shengfang Li [et al.] // Colloid Polym Sci. – 2013. – Vol. 292, № 1. – P. 107–113. <https://doi.org/10.1007/s00396-013-3050-6>

7. Фронтальная сополимеризация акриламида с метилметакрилатом и стиролом в присутствии наночастиц SiO₂, TiO₂. Теплофизические свойства полученных нанокомпозитов / А. О. Тоноян [и др.] // Изв. нац. акад. наук и гос. инженер. ун-та Армении. Сер. техн. наук. – 2013. – Т. 64, № 1. – С. 45–52.
8. Dzhardimalieva, G. I. Frontal Polymerization of Metal-Containing Monomers: A Topical Review / G. I. Dzhardimalieva, A. D. Pomogailo, V. A. Volpert // Journal of Inorganic and Organometallic Polymers. – 2002. – Vol. 12, № 1–2. – P. 1–21.
9. Pojman, J. A. Frontal Polymerization / J. A. Pojman // Polymer Science: A Comprehensive Reference / Eds.: K. Matyjaszewski, M. Möller. – Amsterdam: Elsevier BV, 2012. – P. 957–980. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53349-4.00124-2>
10. Organic–Inorganic Interpenetrating Polymer Networks and Hybrid Polymer Materials Prepared by Frontal Polymerization / Ja. Illescas [et al.] // J. Polym. Sci. Polym. Chem. – 2013. – Vol. 51, iss. 21. – P. 4618–4625. <https://doi.org/10.1002/pola.26882>
11. Polymer Hydrogels of 2-Hydroxyethyl Acrylate and Acrylic Acid Obtained by Frontal Polymerization / Roberta Sanna [et al.] // J. Polym. Sci.: Polym. Chem. – 2012. – Vol. 50, № 8. – P. 1515–1520. <https://doi.org/10.1002/pola.25913>
12. Получение сополимеров акриламида и 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислоты методом фронтальной полимеризации / Е. В. Гринюк [и др.] // Журн. прикл. химии. – 2014. – Т. 87, вып. 12. – С. 1841–1845.

References

1. Mota-Morales J. D., Gutierrez M. C., Ferrer M. L., Sanchez I. C., Elizalde-Pena E. A., Pojman J. A., Del Monte F., Luna-Barcenas G. Deep Eutectic Solvents as Both Active Fillers and Monomers for Frontal Polymerization. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*, 2013, vol. 51, no. 8, pp. 1767–1773. <https://doi.org/10.1002/pola.26555>
2. Grinyuk E. V., Krul L. P. Frontal copolymerization of acrylamide with 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid and sodium acrylate in aqueous solutions. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer Materials and Technologies*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 48–53 (in Russian).
3. Krul L. P. (theme leader), Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University. *Development of methods for the synthesis of carboxylated and sulfonated PAA, aqueous compositions based on them with substances that initiate the formation of hydrogels at elevated temperatures*. Minsk, 2012. 96 p. Grate № 20111280 (in Russian).
4. Amer. Petroleum Inst. *Recommended practices for evaluation of polymers used in enhanced oil recovery operations*. API RP63. Washington: API, 1990. 74 p.
5. Slyusar O. I., Kalmykova T. P., Kermanian F. Influence of various factors on the structure, mechanical properties and technological characteristics of acrylic and polymer hydrogels. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 2003, vol. 37, no. 5, pp. 270–272. <https://doi.org/10.1023/a:1025347010135>
6. Li S., Wang H., Huang W., Liu X. Facile preparation of pH-sensitive poly(acrylic acid-co-acrylamide)/SiO₂ hybrid hydrogels with high strength by in situ frontal polymerization. *Colloid and Polymer Science*, 2013, vol. 292, no. 1, pp. 107–113. <https://doi.org/10.1007/s00396-013-3050-6>
7. Tonoyan A. O., Shakhnazaryan M. A., Antonyan S. B., Khachatryan A. G., Davtyan S. P. Front copolymerization of acrylamide with methyl methacrylate and styrene in the presence of SiO₂, TiO₂ nanoparticles. Thermophysical properties of the obtained nanocomposites. *Izvestiya natsional'noi akademii nauk i gosudarstvennogo inzhenernogo universiteta Armenii. Seriya tekhnicheskikh nauk = Bulletin of the NAS of RA and GIUA. TN series*, 2013, vol. 64, no. 1, pp. 45–52 (in Russian).
8. Dzhardimalieva G. I., Pomogailo A. D., Volpert V. A. Frontal Polymerization of Metal-Containing Monomers: A Topical Review. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers*, 2002, vol. 12, no. 1–2, pp. 1–21.
9. Pojman J. A. Frontal Polymerization. Matyjaszewski K., Möller M. (eds.). *Polymer Science: A Comprehensive Reference*. Amsterdam: Elsevier BV, 2012, pp. 957–980. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53349-4.00124-2>
10. Illescas J., Sanna R., Alzari V., Nuvoli D., Casu M., Sanna R., Rivera E., Mariani A. Organic–Inorganic Interpenetrating Polymer Networks and Hybrid Polymer Materials Prepared by Frontal Polymerization. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry*, 2013, vol. 51, iss. 21, pp. 4618–4625. <https://doi.org/10.1002/pola.26882>
11. Sanna R., Alzari V., Nuvoli D., Scognamillo S., Marceddu S., Mariani A. Polymer Hydrogels of 2-Hydroxyethyl Acrylate and Acrylic Acid Obtained by Frontal Polymerization. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry*, 2012, vol. 50, no. 8, pp. 1515–1520. <https://doi.org/10.1002/pola.25913>
12. Grinyuk E. V., Duk O. G., Sheres I. V., Krul L. P. Preparation of copolymers of acrylamide and 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid by frontal polymerization. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014, vol. 87, no. 12, pp. 1913–1917. <https://doi.org/10.1134/s1070427214120192>

Информация об авторах

Хилиута Елена Олеговна – магистр хим. наук, ст. преподаватель. Гродненский государственный университет имени Янки Купалы (ул. Ожешко, 22, 230023, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: elena.solomevich@mail.ru

Гринюк Евгений Валерьевич – канд. хим. наук, доцент, директор НИИ физико-химических наук БГУ (ул. Ленинградская, 14, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: grinyuk@tut.by

Information about the authors

Khiliuta Alena A. – Senior Lecturer. Yanka Kupala State University of Grodno (22, Ozshesko Str., 230023, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: elena.solomevich@mail.ru

Hryniuk Yauheni V. – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Director. Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220050, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: grinyuk@tut.by